

На правах рукописи

УДК 620.179.14

ЗЕМБЕКОВ НИКОЛАЙ СЕРАФИМОВИЧ

**КОЭФФИЦИЕНТЫ РАЗМАГНИЧИВАНИЯ
ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕЙ
ПРИ НАМАГНИЧИВАНИИ**

Специальность: 01.04.01. – Приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ижевск – 2006

Работа выполнена в Физико-техническом институте Уральского Отделения Российской Академии Наук.

Научный руководитель: доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Захаров Владимир Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор **Ломаев Гелий Васильевич**
кандидат технических наук,
Водеников Сергей Кронидович

Ведущая организация: **Тюменский государственный
нефтегазовый университет**

Защита диссертации состоится “___” _____ 2006 года в _____ часов
на заседании диссертационного совета Д 212.275.03 при Удмуртском государственном
университете по адресу: 426034, г. Ижевск, ул. Университетская, д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УдГУ.

Автореферат разослан _____ 2006 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

Крылов П.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Коэффициенты размагничивания (КР) N являются важной характеристикой «разомкнутых» в магнитном отношении тел из ферромагнитных материалов. Они находят широкое применение при расчете геометрических параметров магнитных элементов различных устройств (сердечники феррозондов, антенн, реле и т.п.), а также при определении магнитных свойств ферромагнитных материалов на образцах специальной формы, например в виде эллипсоидов вращения.

В зависимости от формы магнитных тел КР могут быть константой, не зависящей от магнитных свойств материала (например, КР эллипсоидов вращения $N_{эл}$), но во многих других случаях они зависят не только от формы, относительных размеров тел и магнитных свойств материала (например, от магнитной восприимчивости χ), но и от магнитного состояния вещества в процессе намагничивания тела. В практике магнитных измерений и контроля ферромагнитных изделий наиболее широкое распространение получили изделия и образцы в виде цилиндрического стержня. В связи с этим исследованию КР цилиндрических образцов посвящено достаточно большое количество работ.

Наряду с общим понятием коэффициента размагничивания N как точечного параметра, различают несколько видов КР, отнесенных к тому или иному сечению или объему исследуемого образца: центральный коэффициент размагничивания (ЦКР) $N_{ц}$, называемый также баллистическим КР; дроссельный коэффициент размагничивания N_D ; магнитометрический коэффициент размагничивания N_M . Поскольку наибольшее практическое применение имеет ЦКР $N_{ц}$, то в дальнейшем исследуется (наряду с точечным КР N) только центральный коэффициент размагничивания.

В большинстве работ, посвященных исследованию ЦКР цилиндрических стержней, речь идет, как правило, об относительно

длинных образцах (отношение длины стержня к его диаметру $\lambda \gg 10$), причем расчет $N_{\text{ц}}$ производится в предположении постоянства магнитной восприимчивости материала по всему объему тела. Аналогичные условия имеют место и при экспериментальном определении ЦКР ферромагнитных стержней, когда измерения магнитных параметров и последующий расчет ЦКР ведутся в области максимальной магнитной восприимчивости χ_m (проницаемости μ_m), т.е. при небольших изменениях χ и μ по объему стержня.

Между тем, практически отсутствуют сведения о ЦКР цилиндрических стержней небольшой относительной длины (при $\lambda < 10$), каковыми являются многие образцы и изделия в практике магнитных измерений и контроля. Имеются лишь опубликованные данные для стержней с $\lambda = 10$, которые показывают разброс расчетных значений ЦКР в пределах 15%, что не позволяет использовать их для практических целей.

Кроме того, остается не исследованным изменение ЦКР цилиндрических образцов в широком интервале магнитных полей при намагничивании, когда магнитная восприимчивость материала изменяется от сотен и тысяч (в слабых и средних магнитных полях) до нуля (в сильных полях, когда ферромагнитный цилиндрический стержень становится однородно намагниченным и характеризуется ЦКР N_0). Применение известных эмпирических формул для режима намагничивания во всех областях намагничивающих полей дает значения ЦКР, отличающиеся от истинных на десятки и сотни процентов, особенно в области, близкой к насыщению материала. Очевидно, что такой разброс ЦКР делает невозможным применение этих данных на практике, например, для целей определения кривой намагничивания «вещества» по измеренной кривой намагничивания «тела».

Все это определяет актуальность и необходимость дальнейших теоретических и экспериментальных исследований ЦКР цилиндрических стержней в процессе их намагничивания, преимущественно на коротких

образцах с малой относительной длиной ($\lambda < 10$), а также разработки способа определения магнитных свойств, в частности кривой намагничивания материала, на образцах в виде коротких цилиндрических стержней.

Цель и задачи работы:

Целью работы является исследование ЦКР ферромагнитных цилиндрических стержней при их намагничивании и использование ЦКР для определения магнитных свойств веществ на коротких образцах простой (не эллипсоидальной) формы.

При этом решались следующие задачи:

- изучение процесса намагничивания разомкнутых в магнитном отношении тел, преимущественно коротких цилиндрических стержней, из ферромагнитного материала в широком диапазоне намагничивающих полей;
- разработка методики расчета магнитного поля в центральном сечении цилиндрического стержня с учетом насыщения магнетика;
- моделирование и расчет ЦКР цилиндрических стержней из изотропного и анизотропного ферромагнетика при насыщении материала;
- экспериментальное определение ЦКР коротких цилиндрических стержней на коммутационной кривой намагничивания;
- разработка способа определения кривой намагничивания «вещества» по кривой намагничивания «тела» на образцах в виде коротких цилиндрических стержней с использованием экспериментальных значений ЦКР.

Научная новизна работы:

Дано теоретическое обоснование наблюдаемого экспериментально аномального поведения ЦКР ферромагнитных цилиндрических стержней при намагничивании, заключающегося в том, что благодаря

«вращательному» намагничиванию магнетика в отдельных объемах тела модуль ЦКР при приближении материала образца к магнитному насыщению становится меньше модуля ЦКР однородно намагниченного стержня N_0 и не превышает этого значения при дальнейшем намагничивании образца.

Произведено моделирование и сделан расчет магнитного поля и ЦКР в центральном сечении цилиндрических стержней, определены пределы изменения ЦКР образцов для случаев, когда материал представлен изотропным и анизотропным ферромагнетиками. Показано, что ЦКР стержня из материала с поперечной к его оси магнитной анизотропией при насыщении магнетика становится не только меньше (по модулю) величины N_0 , но и может сменить знак на противоположный (с отрицательного на положительный).

Экспериментально установлены зависимости ЦКР коротких цилиндрических стержней от намагничивающего поля, существенно отличающиеся от известных закономерностей, как в области слабых магнитных полей, так и в области магнитного насыщения материала.

Предложен алгоритм построения кривой намагничивания «вещества» по кривой намагничивания «тела» на образцах ферромагнитных материалов в виде цилиндрических стержней.

Положения, выносимые на защиту:

Результаты теоретических исследований ЦКР разомкнутых ферромагнитных тел при намагничивании с учетом насыщения магнетика.

Результаты моделирования и расчета ЦКР цилиндрических стержней из изотропного и анизотропного ферромагнитного материала при насыщении магнетика в процессе намагничивания.

Результаты экспериментальных исследований ЦКР коротких ферромагнитных цилиндрических стержней.

Алгоритм построения кривых намагничивания «вещества» по кривым намагничивания «тела» на ферромагнитных образцах в виде цилиндрических стержней.

Возможность использования метода определения кривой намагничивания «вещества» на цилиндрических стержнях в практике магнитных измерений и неразрушающего магнитного контроля ферромагнитных изделий.

Научная и практическая значимость работы:

Результаты теоретических и экспериментальных исследований ЦКР ферромагнитных цилиндрических стержней существенно расширяют представления о величине и пределах изменения ЦКР в процессе намагничивания образца.

Обнаруженные закономерности изменения ЦКР ферромагнитных цилиндрических стержней при намагничивании позволяют использовать их для определения характеристик различных ферромагнитных материалов на образцах простой формы и для многопараметрового магнитного контроля изделий в виде коротких цилиндрических стержней.

Личный вклад автора заключается в проведении расчетов параметров магнитного поля при намагничивании разомкнутых ферромагнитных тел, в измерении магнитных характеристик (параметров кривых намагничивания «тела» и «вещества») и подготовке образцов, в обработке результатов измерений, в обсуждении полученных результатов и планировании эксперимента, в написании тезисов докладов, статей и заявок на изобретение. Общая цель и конкретные задачи теоретических и экспериментальных исследований по диссертационной работе сформулированы научным руководителем Захаровым В.А. Обсуждение и интерпретация экспериментальных результатов проводились совместно с

научным руководителем. Основные положения и выводы диссертационной работы сформулированы автором.

Апробация работы:

Основные результаты работы были доложены и обсуждены на следующих Российских и международных конференциях:

Конференция молодых ученых КоМУ-2003 (г.Ижевск, 2003), Конференция молодых ученых КоМУ-2004 (г.Ижевск, 2004), V Международная научно-техническая школа-семинар «Эффект Баркгаузена и аналогичные физические явления» (г.Ижевск, 2004), III Международная научно-техническая конференция «Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении» (г.Тюмень, 2005).

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 5-ти статьях, 4 из которых опубликованы в рецензируемых изданиях, 1 – в сборнике трудов, в одном изобретении и одной заявке на изобретение.

Структура и объем работы.

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, использованной при работе над диссертацией. Содержание диссертации изложено на 111 страницах машинописного текста, включая 27 рисунков и библиографический список, содержащий 64 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** кратко изложено состояние исследований в области изучения КР ферромагнитных тел, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, дана общая характеристика работы.

Первая глава представляет собой обзор работ, посвященных исследованию ЦКР ферромагнитных тел, в частности цилиндрических стержней, как параметра, применяемого для определения магнитных свойств изделий и характеристик ферромагнитных материалов.

Анализ существующей литературы показал, что ЦКР образцов в виде ферромагнитных цилиндрических стержней изучен недостаточно полно и требует дальнейшего изучения.

Все известные формулы привязаны к относительной длине образцов и магнитной восприимчивости материала, но с условием, что восприимчивость постоянна во всем объеме образца независимо от его состояния в процессе намагничивания. В большинстве литературных данных ЦКР ферромагнитных цилиндрических образцов «привязывают» к значениям восприимчивости, равным бесконечности (ЦКР N_∞). Для образцов с $\lambda \geq 4$ несколькими авторами предложены формулы для расчета ЦКР однородно намагниченных образцов. Результаты исследований представлены в виде таблиц либо номограммами, которые неудобны для применения. Что касается табличных данных, то для N_∞ разброс составляет 15%, что является не приемлемым при использовании этих значений для восстановления кривой намагничивания «вещества» по измеренной кривой намагничивания «тела». Мало исследована зависимость ЦКР цилиндрических стержней от магнитной индукции в центральном сечении тела в широком диапазоне магнитного поля при намагничивании, а наблюдаемые аномальные явления этого процесса [Ц1, Ц2] не нашли надежного теоретического обоснования. Кроме того, практически отсутствуют исследования на коротких цилиндрических стержнях, каковыми представлены многие изделия и образцы ферромагнитных материалов, а также методы и средства построения кривых намагничивания «вещества» на образцах в виде цилиндрических стержней. На основании анализа литературных данных сформулированы цель и задачи диссертации.

Во **второй главе** исследовано влияние процессов «вращательного» намагничивания на величину ЦКР разомкнутых ферромагнитных тел при насыщении магнетика [1]. Показаны возможности моделирования и расчета магнитного поля и ЦКР цилиндрических стержней при намагничивании с учетом неколлинеарности векторов намагниченности в объеме стержня.

Дано описание методики расчета ЦКР ферромагнитных цилиндрических стержней при насыщении магнетика в процессе намагничивания [2]. В основе методики лежит принцип эквивалентности намагниченного ферромагнетика и фиктивных токов проводимости (в общем случае поверхностных и объемных), действующих в вакууме. В этом случае напряженность магнитного поля, создаваемого эквивалентными токами, равна напряженности поля реального магнетика $H_m = B_m/\mu_0$, где B_m – магнитная индукция поля магнетика, а μ_0 – магнитная постоянная. Проведен расчет ЦКР цилиндрических стержней из изотропного и анизотропного материалов.

Поскольку цилиндрический стержень обладает осевой симметрией, а также симметрией относительно центрального сечения, то можно рассматривать только четверть продольного сечения стержня в координатах R-Z схемы замещения (рис.1), где R – радиус расчетной точки, а Z – ее осевая координата, отсчитываемая от центрального сечения стержня ($Z = 0$). Пусть

длина стержня $L_c = 20$ м ($Z_c = 10$ м), а диаметр $D_c = 10$ м ($R_c = 5$ м), т.е. $\lambda = L_c/D_c = 2$. Стержень разбит на 50 колец с одинаковым квадратным поперечным сечением, имеющим размеры 1×1 м. Каждые 5 колец, лежащих в одном поперечном сечении стержня, образуют диск (всего в стержне 20 дисков; в схеме замещения – 10 дисков: 1-5, 6-10 и т.д.). Поскольку

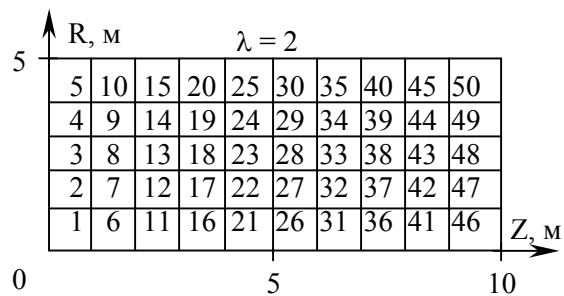


Рис.1. Схема замещения цилиндрического ферромагнитного стержня с относительной длиной $\lambda = 2$.

намагниченность в кольце предполагается однородной по всему объему, то каждое из колец может быть представлено только поверхностными токами с одинаковой плотностью, а в расчетной схеме оно заменяется двумя концентрическими витками с разнонаправленными токами одинаковой величины. При намагниченности \mathbf{M} кольца, параллельной оси стержня один виток («наружный») заменяет диск с диаметром, равным большему диаметру кольца (например, для кольца №7 $R_n = 2$ м), а другой («внутренний») заменяет диск с диаметром, равным меньшему диаметру кольца ($R_v = 1$ м для кольца №7); в результате два витка заменяют объем магнетика между «наружным» и «внутренним» дисками, т.е. объем заданного кольца.

Результаты расчета параметров магнитного поля в центральном сечении стержня показаны на рис.2 [3]: зависимость $H_{mo}(R)$, где H_{mo} – напряженность поля магнетика, соответствующая однородной намагниченности цилиндрического стержня (углы α между векторами намагниченности и осью стержня равны нулю); зависимость $H_m(R)$, где H_m – расчетные значения напряженности поля магнетика для случая, когда углы α в каждом элементарном объеме стержня соответствуют максимальной неколлинеарности векторов \mathbf{M} в стержне из изотропного ферромагнетика ($\alpha = \alpha_{из}$). Последнее соответствует максимальной неоднородности суммарного магнитного поля по длине стержня, что имеет место при большой (> 100) восприимчивости магнетика по всему объему стержня. Как показано нами в [2], для определения углов α между вектором суммарной напряженности магнитного поля $\mathbf{H} = \mathbf{H}_e + \mathbf{H}_m$ (а, стало быть, и вектором \mathbf{M}) и направлением намагничивания в любой точке внутри стержня достаточно знать распределение по его длине параметра $\bar{H} = \Phi/\mu_0 S_c$ (Φ – магнитный поток в центральном сечении стержня, S_c – площадь сечения). Воспользуемся известными законами распределения вдоль оси сердечника (координата Z) относительной величины средней по рассматриваемому поперечному сечению напряженности суммарного магнитного поля $h = \bar{H}/\bar{H}_c$, где \bar{H}_c – средняя напряженность суммарного магнитного поля в центральном сечении

стержня ($Z = 0$). Будем полагать, что магнитная восприимчивость магнетика в момент его насыщения во всем объеме стержня остается не ниже 100. При таком условии зависимость h от относительной координаты $z = Z/Z_c$, где Z_c – полудлина стержня, может быть представлена выражением [Ц1, Ц3]:

$$h = 1 - 0,54 z^2 - 0,24 z^3. \quad (1)$$

На рис.2 дано также среднее по центральному сечению значение H_M ($\bar{H}_M = 981,3$ А/м) при $\alpha = \alpha_{из}$, полученное для стержня с относительной длиной $\lambda = 4$, в сопоставлении с соответствующим значением $\bar{H}_{M0} = 971,4$ А/м для того же стержня с однородной намагниченностью. Как видим, при насыщении магнетика по всему объему ферромагнитного цилиндрического стержня, независимо от относительной длины последнего, средняя по центральному сечению напряженность поля магнетика \bar{H}_M всегда больше величины \bar{H}_{M0} , соответствующей однородной намагниченности стержня. Это означает, что после насыщения магнетика центральный коэффициент намагничивания (ЦКН) стержня $K_{ц}$, как величина, определяемая, в общем случае, соотношением напряженности поля

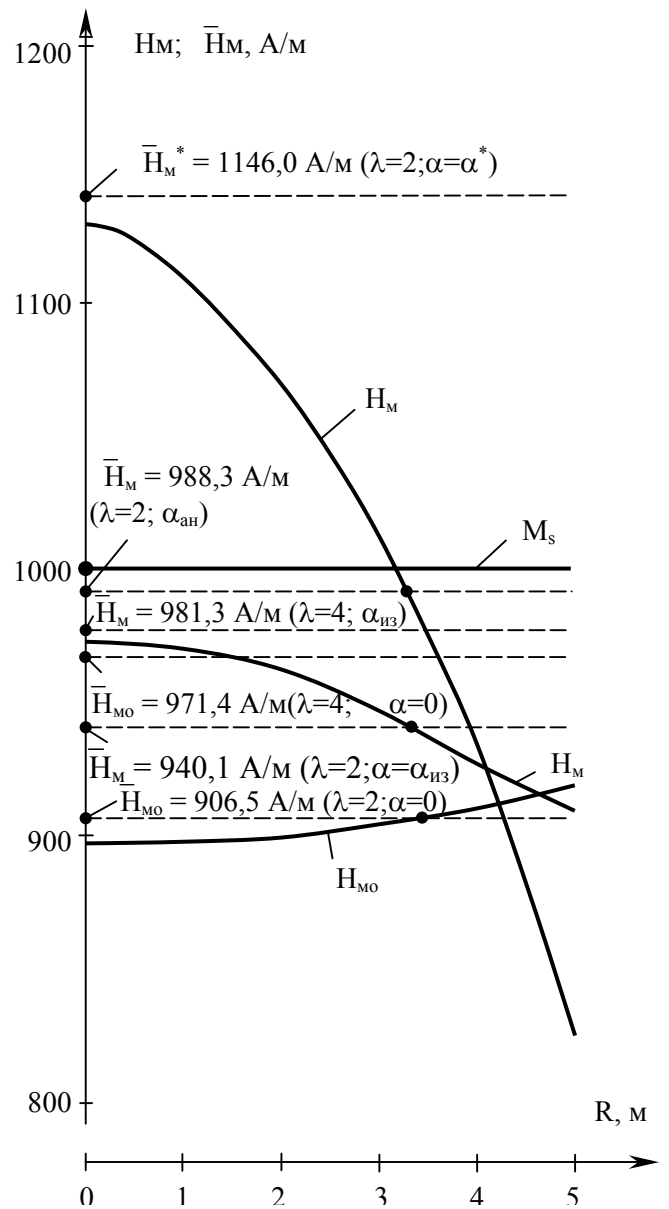


Рис.2. Распределение по радиусу R напряженности поля магнетика (H_M) и ее среднего значения (\bar{H}_M) в центральном сечении цилиндрических ферромагнитных стержней с различными значениями относительной длины λ и углов α между векторами намагниченности и осью стержня.

магнетика и намагниченности,

$$K = H_M/M; K_{ц} = \bar{H}_M/M \quad (2)$$

будет выше значения ЦКН однородно намагниченного стержня ($K_{ц0}$) при любых значениях намагничивающего поля. В то же время, из рис.2 видно, что величина \bar{H}_M стержней любой относительной длины никогда не превышает значение намагниченности насыщения M_s , и только при бесконечно длинном стержне $\bar{H}_M = M_s$. При этом, как следует из формулы (2), ЦКН $K_{ц}$ цилиндрического стержня конечной длины из изотропного ферромагнетика всегда меньше 1, а ЦКР того же стержня $N_{ц} = K_{ц} - 1 < 0$.

Наличие в материале стержня «вращательного» гистерезиса качественно не повлияет на приведенные выше общие закономерности, поскольку нами был рассмотрен предельный случай, когда магнитная восприимчивость материала стержня к моменту насыщения магнетика была не ниже 100, т.е. углы между векторами \mathbf{M}_s в элементарных объемах стержня и его осью были максимально возможными для изотропного материала. «Вращательный» гистерезис скажется лишь на «отставании» векторов \mathbf{M}_s от суммарной напряженности магнитного поля $\mathbf{H} = \mathbf{H}_e + \mathbf{H}_M$, где \mathbf{H}_e – напряженность стороннего магнитного поля, в процессе дальнейшего (после достижения состояния насыщения магнетика) намагничивания стержня.

Представляет интерес исследование влияния поперечной анизотропии магнетика на ЦКН стержня, поскольку с ней непосредственно связано наличие дополнительного угла между вектором \mathbf{M} и суммарной напряженностью магнитного поля \mathbf{H} и, соответственно, увеличение общего угла между \mathbf{M} и направлением намагничивания. Как показано нами в [2], интервал углов α , при которых величина \bar{H}_M от одного кольца остается больше соответствующего значения \bar{H}_{M0} , достигает десятков градусов, особенно для колец, расположенных вблизи его центрального сечения. Например, угол α^* (угол, при котором \bar{H}_M имеет максимальное значение) для кольца с координатами $Z_0 = 2,5$ м, $R_0 = 4,5$ м равен 46° , а реальный угол $\alpha = \alpha_{из}$ между вектором \mathbf{M}_s и осью Z , рассчитанный по упомянутой выше

методике для стержня из изотропного ферромагнетика с $\lambda = 2$, составляет не более 4^0 . В связи с этим следует ожидать, что даже небольшая поперечная анизотропия материала стержня может привести к существенному увеличению угла α и, соответственно, параметра \bar{H}_m в центральном сечении стержня и ЦКН последнего.

Были произведены расчеты ЦКН цилиндрического стержня с $\lambda = 2$ при двух вариантах имитации поперечной анизотропии [3]: предельный случай (гипотетический анизотропный материал) – когда углы α искусственно заданы оптимальными (с точки зрения получения максимального значения \bar{H}_m и, соответственно, ЦКН), т.е. в каждом из колец стержня угол выбран равным α^* ; второй вариант – имитация реальной анизотропии в материале, когда углы α незначительно отличаются, причем только в сторону увеличения, от углов, характерных для изотропного материала ($\alpha_{ан} > \alpha_{из}$).

Расчеты показывают, что для случая с гипотетическим анизотропным материалом с намагниченностью насыщения $M_s = 1000$ А/м величина \bar{H}_m^* при $\alpha = \alpha^*$ равна 1146,0 А/м (рис.2.), т.е. ЦКН существенно превышает единицу: $K_{ц}^* = \bar{H}_m^*/M_s = 1,146$; при этом $N_{ц}^* = 0,146$, т.е. значительно больше нуля. Поскольку основной вклад в параметр \bar{H}_m^* дают кольца, расположенные вблизи центрального сечения стержня, то ЦКН достигает значения 1 уже при относительной длине стержня $\lambda = 1$. С дальнейшим увеличением λ стержней коэффициент $K_{ц}^*$ увеличивается. Данный случай является предельным, достигаемым за счет искусственного задания угла α^* в каждом кольце. При этом в одних кольцах (вблизи центрального сечения стержня) введена поперечная (вдоль радиуса) анизотропия для увеличения углов α по сравнению с углами α^* данных колец, а в других (удаленных от центрального сечения) введена продольная анизотропия для уменьшения углов, поскольку углы $\alpha_{из}$ на концевых участках стержня оказываются больше, чем значения α^* для этих участков. Например, для кольца 10 угол

$\alpha_{из}$ составляет около $2,4^0$, а угол $\alpha^* \approx 44^0$; в то же время для кольца 50 эти углы равны соответственно 52^0 и 32^0 .

Расчет, проведенный при небольших увеличениях углов α , имитирующих наличие реальной поперечной анизотропии материала, для стержня с $\lambda = 2$, показывает, что достаточно небольшого (на несколько градусов) приращения углов α колец, для того чтобы ЦКН достиг значения $K_{ц} = 1$. В качестве примера на рис.2. показана зависимость $H_m(R)$ и параметр \bar{H}_m для стержня с $\lambda = 2$ и увеличенными по сравнению со случаем изотропного материала углами α ($\alpha_{ан} > \alpha_{из}$).

В **третьей главе** описана методика экспериментального определения ЦКР коротких ферромагнитных цилиндрических стержней по результатам измерений параметров магнитных полей образцов. Дано описание источников однородного магнитного поля для намагничивания ферромагнитных цилиндрических стержней с малой относительной длиной [8].

Для определения ЦКР образцов использовался метод сравнения коммутационных (основных) кривых намагничивания «тела» $B(H_e)$ и «вещества» $B(H_i)$. Измерения выполнялись при комнатной температуре на ферромагнитных образцах в виде коротких (длина не более 30 мм при относительной длине $3 < \lambda < 10$) цилиндрических стержней.

Определение суммарной магнитной индукции B в образце производилось по величине магнитного потока, измеряемого с помощью короткой (не более 1 мм) катушки, установленной в центральном сечении стержня. При этом учитывалась величина зазора между цилиндрической поверхностью образца и средним круговым контуром («средним витком») измерительной катушки.

Напряженность стороннего (внешнего, намагничивающего) магнитного поля H_e определялась по величине тока и постоянной намагничивающего устройства – соленоида и пермеаметра. Постоянная соленоида была

определена средствами метрологической организации, а постоянная пермеаметра определялась, в свою очередь, по постоянной соленоида.

«Внутреннее поле» H_i в образцах определялось по измерению касательной составляющей напряженности магнитного поля H в нейтральной плоскости образца на различных заданных расстояниях от его цилиндрической поверхности с последующей экстраполяцией данных на указанную поверхность. В области слабых и средних магнитных полей измерения велись в соленоиде, при сильных магнитных полях – в пермеамetre. Измерение касательной составляющей H производилось с помощью малогабаритного датчика Холла (ДХ) с активной площадкой $0,35 \times 0,35 \text{ мм}^2$ и расстоянием от ее центра до поверхности исследуемого образца 0,4 мм. Для устранения систематической ошибки при определении сопоставляемых параметров кривых намагничивания H_e и H_i градуировка ДХ производилась в соленоиде. С этой же целью градуировка пермеаметра при заданном фиксированном расстоянии между полюсами магнитопровода производилась по показаниям ДХ.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований ЦКР ферромагнитных цилиндрических стержней. Описан способ построения кривых намагничивания «вещества» по кривым намагничивания «тела» на ферромагнитных образцах в виде цилиндрических стержней [9, 10]. Показана возможность использования указанного способа в практике магнитных измерений и неразрушающего магнитного контроля ферромагнитных изделий. На рис.3 представлены

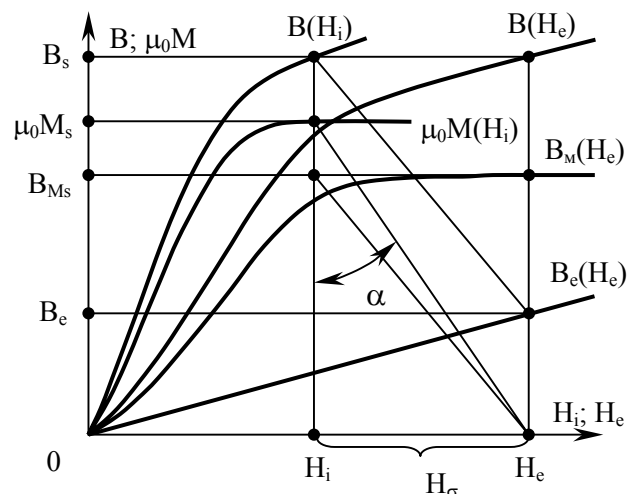


Рис.3. Параметры магнитного поля и намагниченности магнетика в центральном сечении цилиндрического ферромагнитного стержня при его намагничивании.

кривые намагничивания «вещества» и «тела» ферромагнитного образца в виде стержня конечных размеров. Из рисунка видно, что при достижении суммарной магнитной индукцией B значения B_s материал находится в насыщении, при этом намагниченность равна M_s , а индукция поля магнетика – $B_{ms} = B_s - \mu_0 H_e$. Поскольку, как было показано нами ранее, при достижении насыщения в материале модуль ЦКР стержня становится близким к значению $|N_0|$, то появляется возможность определения величины M_s по формуле

$$M_s = B_{ms}/\mu_0(1 + N_0) = (B_s - \mu_0 H_e)/\mu_0(1 + N_0). \quad (3)$$

С другой стороны, экспериментально установлено, что уменьшение модуля ЦКР стержня до значения $|N_0|$ по мере насыщения магнетика происходит в сравнительно низких магнитных полях (когда магнитная восприимчивость магнетика еще значительно больше нуля), а именно при некотором значении B_0 , лежащем в интервале $B_s < B_0 < 1,3 \mu_0 M_s$. Параметр B_0 зависит от относительной длины стержней и для сравнительно узкого диапазона λ практически является постоянной величиной. Поскольку модуль ЦКР после насыщения магнетика хотя и находится ниже значения $|N_0|$, но не сильно от него отличается, то при $B \geq B_0$ можно принять его постоянным и равным $|N_0|$. Таким образом, если измерения проводить на цилиндрических стержнях в некотором заданном, достаточно узком, диапазоне λ , а значения B относить к величине $\mu_0 M_s$, т.е. использовать приведенный параметр $b = B/\mu_0 M_s$, то для большого класса материалов можно использовать эмпирически найденную величину $b_0 = B_0/\mu_0 M_s$, начиная с которой модуль ЦКР $|N_{ц}| \leq |N_0|$.

Что касается величины $|N_{ц}|$ в области слабых и сильных магнитных полей, то здесь также обнаружены определенные закономерности, позволяющие получить удобные для расчетов градуировочные характеристики. Известно, что существуют различные аналитические выражения для расчета ЦКР цилиндрических стержней, учитывающих как параметр λ , так и магнитную восприимчивость χ [Ц4, Ц5]. Расчеты показывают, что при высоких значениях χ модуль ЦКР $|N_{расч}|$ меняется

весьма слабо и только при $\chi < 50$ заметно уменьшается, стремясь к $|N_0|$. Аналогичные результаты наблюдаются и в эксперименте со стержнями из различных изотропных ферромагнитных материалов: на начальных участках кривых намагничивания, где магнитная восприимчивость для многих ферромагнитных материалов

составляет, как правило, сотни и тысячи, модуль ЦКР при увеличении B изменяется незначительно, и только при приближении величины $b = B/\mu_0 M_s$ к значению b_0 плавно уменьшается до величины $|N_0|$.

Практически начальный участок зависимости $|N_{||}|(b)$ можно представить в виде прямой, наклоненной под небольшим углом к оси b (практическим параллельным ей) и лишь при $b > 0,7$ модуль ЦКР начинает заметно уменьшаться, стремясь к $|N_0|$.

В качестве примера на рис.4 показаны экспериментально полученные зависимости $|N_{||}|(b)$ для двух коротких цилиндрических стержней с различной относительной длиной: $\lambda_1 = 3,02$, $\lambda_2 = 7,25$. На рис.5 приведены соответствующие кривые зависимости относительного ЦКР n

$= N_{||}/N_0$ от b , как более удобные для расчетов в качестве градировочных

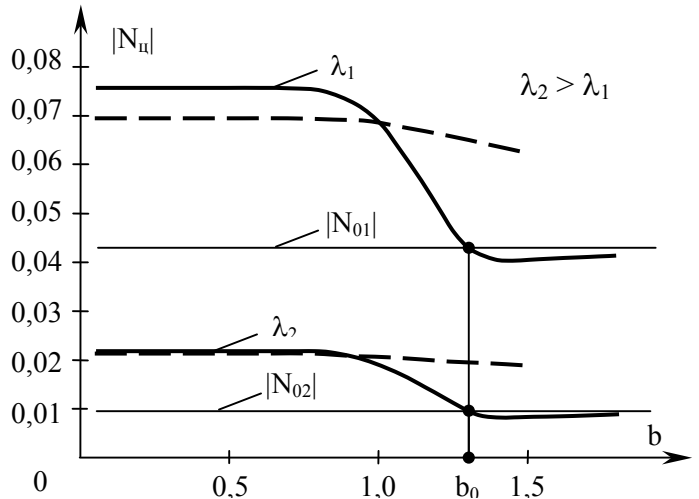


Рис.4. Зависимость модуля ЦКР $|N_{||}|$ от относительной магнитной индукции b для цилиндрических стержней с различной относительной длиной: $\lambda_1 = 3,0218$, $\lambda_2 = 7,2538$.

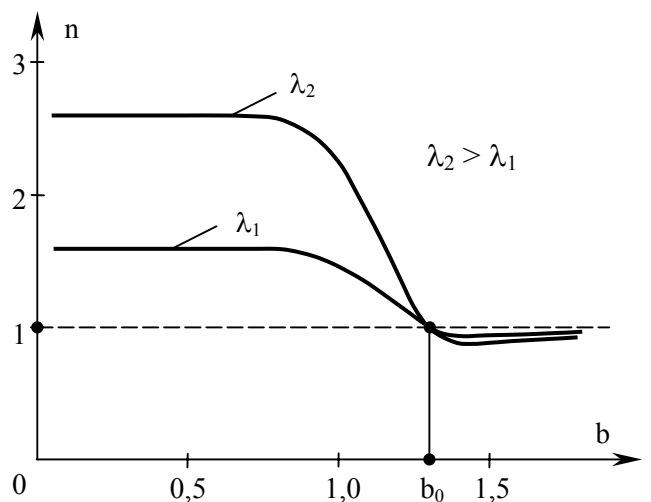


Рис.5. Зависимости приведенного коэффициента $n = N_{||}/N_0$ от относительной магнитной индукции b для образцов с λ_1 и λ_2 .

характеристик. Зависимости $|N_{\text{ц}}|(b)$ и $n(b)$ получены следующим образом. На пяти образцах материала (сталь Ст.3) с одинаковым диаметром и различной длиной ($3 < \lambda < 8$), включая упомянутые образцы с λ_1 и λ_2 , были измерены коммутационные кривые намагничивания «тела» $B(H_e)$. При этом магнитная индукция измерялась с помощью одной и той же короткой катушки, подключенной к фотокомпенсационному микровеберметру Ф191, снабженному цифровым измерителем потокосцепления. Стороннее (внешнее) намагничивающее поле создавалось соленоидом с известной постоянной K , при этом $H_e = KI$, где I – ток в соленоиде, измеряемый высокоточным цифровым амперметром. На одном из образцов данного материала была измерена коммутационная кривая намагничивания «вещества» $B(H_i)$, причем «внутреннее поле» H_i определялось с помощью малогабаритного преобразователя Холла путем измерения напряженности магнитного поля на различных расстояниях от цилиндрической поверхности образцов и последующей экстраполяции данных на указанную поверхность. Для исключения систематической ошибки при вычислении ЦКР через измеренные величины B , H_e и H_i , связанной с использованием различных измерительных преобразователей при определении этих параметров, измерение магнитной индукции во всех случаях производилось с использованием одной и той же катушки, а веберметр и датчик Холла градуировались в том же соленоиде, в котором происходило намагничивание образцов.

Выявленные ранее закономерности изменения ЦКР ферромагнитных цилиндрических стержней, как в процессе намагничивания, так и в однородно намагниченном состоянии, позволяют сформулировать алгоритм построения кривой намагничивания «вещества» по кривой $B(H_e)$, снятой на цилиндрическом стержне из исследуемого материала, который заключается в следующем.

Сначала определяют индукцию поля магнетика в центральном сечении стержня, соответствующую насыщению материала, $B_{\text{мс}}$ и намагниченность

насыщения M_s по формуле (3). Затем при заданном значении B определяют параметр $b = B/\mu_0 M_s$ и, используя градировочные зависимости $n(b)$, определяют величину n , соответствующую данной λ образца. Далее, с использованием одной из известных формул или табличных данных находят значение N_0 , вычисляют ЦКР стержня $N_{\text{ц}} = nN_0$ и определяют «внутреннее поле» по формуле

$$H_i = (H_e - |N_{\text{ц}}| B/\mu_0)/(1 - |N_{\text{ц}}|). \quad (4)$$

Операцию повторяют при различных значениях B и строят зависимость $B(H_i)$.

На рис.6 показаны примеры восстановления кривых намагничивания существенно различных ферромагнитных материалов по измеренным кривым намагничивания «тела» на образцах в виде коротких цилиндрических стержней. Сплошными линиями показаны основные

(коммутационные) кривые намагничивания $B(H_i)$ двух ферромагнитных материалов – сталь ШХ15 (кривая 1 на начальном участке намагничивания при $0 < H_i < 40$ А/см и кривая 3 на участке насыщения при $H_i > 40$ А/см) и сталь Ст.3 (соответственно кривые 2 и 4), измеренных известным способом: образец материала в виде цилиндрического стержня

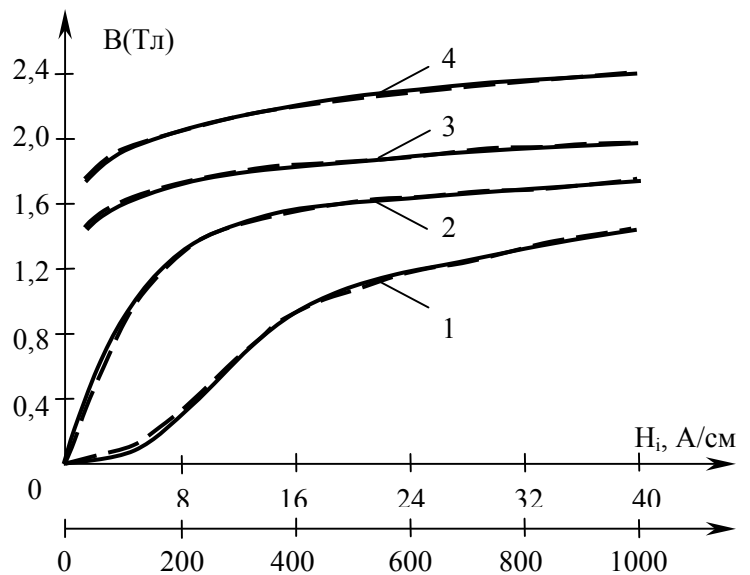


Рис.6. Кривые намагничивания стали ШХ15(1,3) и стали Ст.3(2,4), полученные при различных способах определения «внутреннего поля» H_i : непосредственно по величине напряженности магнитного поля у поверхности образца (сплошные линии) и по кривой намагничивания «тела» (пунктир).

после динамического размагничивания помещался в однородное стороннее магнитное поле с постепенно увеличивающейся напряженностью поля H_e .

При нескольких заданных значениях H_e в интервале от нуля до магнитного насыщения материала производилось перемагничивание стержня по данной петле магнитного гистерезиса и с помощью фотокомпенсационного веберметра и короткой катушки измерялась суммарная магнитная индукция B в центральном сечении стержня. По результатам измерений строилась зависимость $B(H_e)$. С помощью малогабаритного датчика Холла измерялась касательная составляющая напряженности магнитного поля у поверхности образца H_τ вблизи его центрального сечения на различных расстояниях от поверхности и определялось внутреннее поле H_i описанным выше способом. С использованием зависимостей $B(H_e)$ и $H_i(H_e)$ строилась кривая намагничивания $B(H_i)$.

Для сравнения на рис.6 пунктиром показаны кривые намагничивания «вещества», построенные на основе кривых намагничивания «тела» $B(H_e)$ цилиндрических стержней из упомянутых сталей ($\lambda = 3,8246$ для стали ШХ15, $\lambda = 4,7647$ для стали 3) с использованием градировочных зависимостей, взятых из семейства кривых, лежащих в интервале, показанном на рис.5. Отклонения восстановленной кривой намагничивания от зависимости $B(H_i)$, полученной при непосредственном измерении «внутреннего поля», составляют не более 0,5 А/см вдоль оси H_i .

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В настоящей работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований ЦКР ферромагнитных цилиндрических стержней в широком диапазоне намагничивающих полей и возможность определения кривой намагничивания материала на образцах в виде коротких стержней с использованием экспериментальных значений ЦКР.

Основные результаты диссертационной работы могут быть сформулированы следующим образом:

1. Впервые дано теоретическое обоснование наблюдаемого экспериментально аномального поведения ЦКР ферромагнитных стержней

при намагничивании. На примере модельного образца из изотропного ферромагнетика в виде бесконечно длинного стержня с прямоугольным сечением, намагничиваемого однородным поперечным магнитным полем, показано, что благодаря «вращательному» намагничиванию магнетика модуль ЦКР при приближении материала образца к магнитному насыщению становится меньше модуля ЦКР однородно намагниченного стержня N_0 и не превышает этого значения при дальнейшем намагничивании образца.

2. Проведены моделирование и расчет параметров магнитного поля и ЦКР ферромагнитных цилиндрических стержней при насыщении магнетика с учетом анизотропных свойств материала. Показано, что если материал стержня изотропен, то его ЦКР всегда меньше нуля. Наличие поперечной к оси стержня магнитной анизотропии материала приводит к увеличению неоднородности поля магнетика в центральном сечении стержня. При этом среднее по сечению значение \bar{H}_M становится больше по сравнению со случаем изотропного материала.

3. Впервые получены экспериментальные значения ЦКР коротких (с относительной длиной $3 < l < 10$) ферромагнитных цилиндрических стержней в широком диапазоне намагничивающих полей. ЦКР стержней существенно отличающиеся от рассчитанных по известным эмпирическим формулам, не учитывающим магнитное состояние материала образца при намагничивании (различие ЦКР на начальном участке кривой намагничивания достигает 7%, при насыщении материала – десятков процентов). Предложено использование полученных данных для определения свойств ферромагнитных материалов на образцах в виде цилиндрических стержней, а также при многопараметровом магнитном контроле ферромагнитных изделий.

4. Разработан алгоритм и предложен способ определения кривой намагничивания «вещества» по измеренной кривой намагничивания «тела» с использованием полученных экспериментальных значений ЦКР ферромагнитных цилиндрических стержней. На базе новых технических

решений создана экспериментальная установка для исследования магнитных свойств ферромагнитных материалов на образцах простой (не эллипсоидальной) формы. На способ и устройство поданы заявки на выдачу патента РФ на изобретение.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

1. Горкунов Э.С., Захаров В.А., Зембеков Н.С., Ульянов А.И., Чулкина А.А. Коэффициенты размагничивания ферромагнитных стержней при насыщении магнетика // Дефектоскопия. – 2005. - №2. - С.23-32.
2. Захаров В.А., Зембеков Н.С., Захаров А.В. Русских И.Т. Учет неколлинеарности векторов намагниченности при расчете магнитных полей в ферромагнитных цилиндрических стержнях // Изв. вузов. Физика. - 2005. - №2. - С.63-69.
3. Захаров В.А., Зембеков Н.С., Захаров А.В. Русских И.Т. Расчет центральных коэффициентов намагничивания цилиндрических ферромагнитных стержней при насыщении магнетика. // Изв. вузов. Физика. - 2005. - №4. - С.53-61.
4. Зембеков Н.С., Захаров В.А. О коэффициентах размагничивания ферромагнитных стержней // Конференция молодых ученых КоМУ-2003: Тез. докл. - Ижевск, 2003. - С.13-14.
5. Зембеков Н.С., Захаров В.А. Магнитное поле внутри цилиндра при насыщении магнетика // Конференция молодых ученых КоМУ-2004: Тез. докл. - Ижевск, 2004. - С.16.
6. Зембеков Н.С., Захаров В.А. К расчету коэффициентов намагничивания цилиндрических ферромагнитных стержней при насыщении магнетика // Магнитные явления: Сб. ст., Ижевск. – 2005. - Вып. 2. - С. 65-73.
7. Зембеков Н.С., Захаров В.А. Магнитный контроль ферромагнитных стержней по параметрам кривых намагничивания // III Международная науч.-техн. конф. «Новые материалы, неразрушающий контроль и

наукоемкие технологии в машиностроении»: Тез. докл. - Тюмень, 2005. – С.328-329.

8. Заявка на изобретение «Способ определения кривой намагничивания ферромагнитного материала» № 2005135275(039430) от 14.11.05 г. (авторы Зембеков Н.С., Захаров В.А.).

9. Решение от 21.02.06 о выдаче патента на изобретение «Пермеаметр» по заявке № 2005101538 от 24.01.05 г. (авторы Захаров В.А., Зембеков Н.С.).

10. Захаров В.А., Зембеков Н.С. Построение кривой намагничивания «вещества» по кривой намагничивания «тела» ферромагнитных цилиндрических стержней // Измерительная техника. - 2006 (принята к печати).

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

Ц1. Аркадьев В.К. Электромагнитные процессы в металлах. Ч.1-2. - М.-Л.: ОНТИ, 1934. Ч.1. Постоянное электрическое и магнитное поле. - 230 с.

Ц2. Будрин. С.П. «Определение баллистическим методом коэффициентов размагничивания цилиндрических стержней с плоскими и закругленными концами» // Временник Главной Палаты мер и весов. – 1930. – Вып. 4 (16). – С.61-99.

Ц3. Трусов Н.К., Мельгуй М.А., Кулагин В.Н., Шидловская Э.А. Экспериментальный способ определения кривых сдвига в нейтральном сечении ферромагнитных цилиндров из конструкционных сталей // Дефектоскопия. – 1987. – № 7. – С.32-38.

Ц4. Зверев В.С., Катык В.С. К определению центрального коэффициента размагничивания цилиндрических стержней // Дефектоскопия. – 1991. – №1. – С.40-44.

Ц5. Матюк В.Ф., Осипов А.А. Некоторые замечания о центральном размагничивающем факторе тел разной формы. I. Коэффициент размагничивания эллипсоидов и цилиндров // Дефектоскопия. – 1999. – №7. – С.41-49.